

## 수자원 계획수립을 위한 다기준의사결정기법의 적용: 2. 가중치와 평가치에 대한 민감도 분석

### Application of Multi-criteria Decision Making Techniques for Water Resources Planning: 2. Sensitivity Analysis of Weighting and Performance Values

정은성\*

Chung, Eun-Sung

#### Abstract

This study aims to present the sensitivity analysis approach for multi-criteria decision making (MCDM) method to reduce the uncertainty of weighting and performance values. This study focuses on two major problems of the uncertainty for MCDM method. The first major problem is how to determine the most critical criterion and the second is how to determine the most critical measure of performance. This study used the application of weighted sum method for water resources planning. The criticality degrees and the sensitivity coefficients of criterion and alternative are used. This results of sensitivity analysis can be applied to the general water resources planning in real.

**Keywords** : alternative criticality, criterion criticality, multi-criteria decision making (MCDM), alternative sensitivity, criterion sensitivity

#### 요 지

본 연구는 다기준 의사결정 문제에서 항상 발생하는 가중치와 대안들의 평가치에 대한 불확실성을 최소화하기 위해 민감도 분석을 수행하는 절차를 제시하였다. 제기되는 가중치에 대한 불확실성을 극복하기 위해 일반적으로 순위가 뒤바뀔 수 있는 가장 민감한 평가기준의 결정과 대안의 효과 측정자료의 결정이 있다. 본 연구는 유량확보와 수질개선을 위한 수자원 계획수립을 위해 가중합계법을 이용한 문제에 두 경우의 민감도 분석을 모두 수행하였다. 이 과정에서 결정계수와 민감도 계수를 산정하여 이용하였다. 본 연구에서 제시한 민감도 분석 과정은 향후 수자원 계획 수립에 폭넓게 활용될 수 있다.

**핵심용어** : 대안의 중요도, 평가기준의 중요도, 다기준의사결정기법, 대안의 민감도 계수, 평가기준의 민감도 계수

#### 1. 서 론

다기준 의사결정(Multi-Criteria Decision Making, MCDM) 분야는 최근 30년간 지속적으로 발전되어 왔으며 수자원 분야 역시 1990년대 이후 MCDM의 적용에 대한

연구가 꾸준히 진행되어 왔다. MCDM은 이산(discrete) 의사결정 문제에 접근하는 경우 많은 대안들의 우선순위를 결정하는데 사용된다. 즉, 고려한 대안과 판단기준에 대해 가장 우선순위가 높은 대안들을 제시하기 때문에 현실에서 더 많은 문제를 해결할 수 있다(정은성, 2012).

\* 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학부 조교수 (e-mail: eschung@seoultech.ac.kr)  
Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

MCDM은 지극히 복잡한 자연현상과 인간관계, 인간의 의사결정과정 등을 복합적으로 고려해서 결정할 수 있도록 유도하는 도구이므로 불확실성이 매우 높다. Ascough et al. (2008)은 이러한 불확실성이 크게 네 가지 형태로 존재한다고 제시하였다. 첫째는 지식의 불확실성(knowledge uncertainty)으로 실제 현상과는 다른 의사결정과정의 단순화, 입력 자료의 불확실성, 사용하는 모형의 불확실성 등으로 구성되어 있다. 그러나 이러한 불확실성은 기술적으로 충분히 저감시킬 수(epidemic or reducible) 있는 대상이다(Walker et al., 2003). 두 번째는 변동성의 불확실성(variability uncertainty)으로 자연과 인간 내부에 존재하는 근본적인 불확실성과 관련되어 있다. 자연현상은 본래 무작위성(randomness)이 존재하므로 예측이 어렵지만 의사결정과정에 매우 크게 영향을 미친다. 이러한 불확실성은 무작위적이므로 예측이 어려워져 저감시키기 매우 어렵다(Rose and Cowan, 2003). 세 번째는 의사결정의 불확실성(decision making uncertainty)으로 사회적 목적들을 어떻게 정량화해서 비교하는지에 관련이 있다. 즉 의사결정 문제는 대부분 사회적 합의가 이루어져야 하는데 이러한 합의를 위한 기준을 결정하는 과정에도 상당한 불확실성이 존재한다(Morgan and Henrion, 1990). 마지막은 언어적 불확실성(linguistic uncertainty)으로 언어 자체가 가지는 모호함으로 인해 정확한 의미가 시간이 지남에 따라 변할 수 있다는 점이다(Regan et al., 2002). 예를 들어 “적당한 수준 이상의 홍수방어대책에 대해 투자한다”는 의미는 대상자와 시간에 따라 달라지기 때문이다. 이중 세 번째 불확실성에 대해 의사결정자들을 적절한 설명으로 이해시키지 못한다면 매우 큰 위험을 초래하게되며 결과도 영땡하게 흘러갈 수 있다(Frederick and Peterman, 1995; Rose and Cowan, 2003). 따라서 본 연구에서는 세 번째 불확실성 중 사회적 목적들의 중요도를 정량화하는 가중치에 대한 민감도 분석을 수행한다.

수자원 분야에도 MCDM 기법들을 적용할 때 가장 어려운 문제는 위의 세 번째 불확실성에 속하는 평가기준들에 대한 가중치의 결정이다. 비교적 정교한 대안 평가치(measure of performance)를 수문 모의모형이나 수리분석을 통해 산정했음에도 불구하고 가중치의 결정으로 인해 의사결정의 객관성을 확보하는 것은 항상 어려운 일로 여겨져 왔다. 즉 수자원 분야에서 가중치의 결정은 불확실성으로 인해 문제점이 지속적으로 제기되어 왔으나 특별한 해법이 존재하지 않기 때문에 부득이하게 델파이 기법(delphi technique)이나 계층화 분석과정(analytic hierarchy

process, AHP)을 전문가 집단을 대상으로 설문조사하는 방법이 일반적으로 사용되어왔다. 하지만 가중치의 결정은 관련분야 전문가들이 고민해서 산정해도 다른 전문가들에 의해 비판을 받을 수 있는 문제가 항상 존재한다. 따라서 본 연구에서는 MCDM 문제에서 제기될 수 있는 불확실성 중 Triantaphyllou and Sanchez (1997)가 제시한 가장 일반적인 두 개의 문제에 대해 접근하기로 한다. 첫 번째 문제는 가장 결정적인 평가기준은 무엇인가이며 두 번째 문제는 가장 결정적인 대안의 평가 값은 무엇인가이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 평가기준에 대한 민감도 분석

대안  $A_i$ 의 효용값을  $P_i$ 라 하자. 평가기준  $C_k$ 의 현재 가중치가  $w_k$ 일 때  $P_i \geq P_j$ 인 경우 대안  $A_i$ 와  $A_j$ 의 순위를 바꿀 수 있는 최소 가중치를  $\delta_{k,i,j}$ 라 하면 평가기준  $C_k$ 에 대한 새로운 가중치  $w_k^*$ 는

$$w_k^* = w_k - \delta_{k,i,j} \quad (1)$$

여기서  $w_k$ 는 평가기준  $C_k$ 에 대한 이전 가중치이다.

새롭게 바뀐  $w_k^*$ 를 사용해서 본래 가중치를 표준화하면 다음 수식을 이용할 수 있다.

$$\begin{aligned} w_1^l &= \frac{w_1^*}{w_1^* + w_2 + \dots + w_n} \\ w_2^l &= \frac{w_2}{w_1^* + w_2 + \dots + w_n} \\ &\vdots \\ w_n^l &= \frac{w_n}{w_1^* + w_2 + \dots + w_n} \end{aligned} \quad (2)$$

새로운 가중치  $w_k^l$ 를 이용해서 산정한  $P_i^l < P_j^l$ 가 되는 경우 가중합계법(weighted sum method, WSM)을 사용하면 다음 수식을 만족해야 한다.

$$P_i^l = \sum_{k=1}^n w_k^l a_{ik} < P_j^l = \sum_{k=1}^n w_k^l a_{jk} \quad (3)$$

여기서,  $a_{ik}$ 와  $a_{jk}$ 는 대안  $A_i$ 와  $A_j$ 의  $k$  기준에 대한 효용값(performance measure)이다.

수식의 간편한 정리를 위해  $k=1, i=1, j=2$ 라 하고, Eq. (3)을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{w_1^* a_{11}}{w_1^* + \sum_{j=2}^n w_j} + \frac{\sum_{j=2}^n w_j a_{1j}}{w_1^* + \sum_{j=2}^n w_j} < \frac{w_1^* a_{21}}{w_1^* + \sum_{j=2}^n w_j} + \frac{\sum_{j=2}^n w_j a_{2j}}{w_1^* + \sum_{j=2}^n w_j} \quad (4)$$

$$w_1^* a_{11} + \sum_{j=2}^n w_j a_{1j} < w_1^* a_{21} + \sum_{j=2}^n w_j a_{2j}$$

Eqs. (1) and (4)를 결합하면

$$-\delta_{1,1,2} a_{11} + \sum_{j=1}^n w_j a_{1j} = -\delta_{1,1,2} a_{21} + \sum_{j=1}^n w_j a_{2j}$$

$$-\delta_{1,1,2} a_{11} + P_1 = -\delta_{1,1,2} a_{21} + P_2$$

$$P_1 - P_2 < (a_{11} - a_{21}) \delta_{1,1,2} \quad (5)$$

$$\delta_{1,1,2} < \frac{(P_2 - P_1)}{(a_{21} - a_{11})}, \text{ if } (a_{21} > a_{11}), \text{ or}$$

$$\delta_{1,1,2} > \frac{(P_2 - P_1)}{(a_{21} - a_{11})}, \text{ if } (a_{21} < a_{11})$$

Eq. (5)를 일반화하여 정리하면 다음과 같다.

$$\delta_{k,i,j} < \frac{(P_j - P_i)}{(a_{jk} - a_{ik})}, \text{ if } (a_{jk} > a_{ik}), \text{ or} \quad (6)$$

$$\delta_{k,i,j} > \frac{(P_j - P_i)}{(a_{jk} - a_{ik})}, \text{ if } (a_{jk} < a_{ik})$$

본래 설정된 가중치 대비 변화량의 비율인  $\delta_{k,i,j}^l$  ( $1 \leq i < j \leq m, 1 \leq k \leq n$ )은 다음과 같이 정의한다.

$$\delta_{k,i,j}^l = \delta_{k,i,j} \times \frac{100}{w_k} \quad (7)$$

그런데 만족할 만한  $\delta_{k,i,j}$ 를 산정하기 위해서는 결정된 가중치가 0과 1 사이에 있어야 하므로 다음 수식과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{(P_j - P_i)}{(a_{jk} - a_{ik})} \leq w_k \quad (8)$$

$A_i$ 가  $A_j$ 보다 월등히 우수함(dominate) 경우(즉, 모든  $k$ 에 대해  $a_{ik} \geq a_{jk}$ ),  $A_j$ 와  $A_i$ 의 순위는 뒤바뀔 수 없다. 또한 평가기준  $C_k$ 가 견고한 평가기준(robust criteria)일 경우 어떠한  $\delta_{k,i,j}^l$ 도  $A_i$ 와  $A_j$ 의 순서를 바꾸는데 효용이 없다. 즉 Eq. (3)이 평가조건  $C_k$ 에 대해 성립하지 않을 경우 어떠한 가중치의 변화도 순위변동을 일으킬 수 없고  $C_k$ 는 견고한 평가기준이 된다.

이렇게 각 대안 간 순위 변동을 위한 평가기준 별 상대

적 변화율 중 가장 작은 값을 보이는 평가기준을 중요결정기준(percent top critical criterion, PT)이라 하고 모든  $|\delta_{k,i,j}^l|$ 에 대해서 가장 작은 값을 보이는 기준을 최고결정기준(percent any critical criterion, PA)이라고 한다.

평가기준  $C_k$ 의 중요도(criticality of degree of criterion  $C_k$ ),  $D_k^l$ 은 현재의 순위가 뒤바뀌는 가장 작은 가중치의 변화율을 의미하며 다음과 같은 수식을 이용해서 산정될 수 있다.

$$D_k^l = \min |\delta_{k,i,j}^l| \quad (\text{모든 } n \geq k \geq 1) \quad (9)$$

평가기준  $C_k$ 의 민감도 계수(sensitivity of coefficient of criterion  $C_k$ ),  $Sens(C_k)$ 는 평가기준 중요도  $D_k^l$ 의 역수이며 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$sens(C_k) = \frac{1}{D_k^l} \quad (\text{모든 } n \geq k \geq 1) \quad (10)$$

어떠한 가중치의 변화에도 대안들의 순위가 바뀌지 않는다면 민감도 계수는 0이 되어서 중요도는 계산할 수 없게 된다.

## 2.2 평가치에 대한 민감도 분석

대안  $A_i$ 와  $A_j$ 의 순위가 뒤바뀔 수 있는  $a_{ij}$ 의 평가기준  $C_k$ 에 대한 최소 변화량을  $\tau_{i,j,k}$  ( $1 \leq i < j \leq m, 1 \leq k \leq n$ )라 하면

$$a_{ik}^l = a_{ik} - \tau_{i,j,k} \quad (11)$$

$P_i \geq P_j$ 인 경우  $P_i < P_j$ 를 만족하기 위해 Eq. (11)을 이용해서 정리하면 다음과 같다.

$$a_{i1} w_1 + \dots + a_{in} < a_{j1} + \dots + a_{jk}^l + \dots + a_{jn} \quad (12a)$$

Eq. (11)을 Eq. (12a)에 대입하면

$$P_i < -\tau_{i,j,k} w_k + P_j \quad (12b)$$

따라서  $\tau_{i,j,k}^l$ 는 WSM의 경우 다음 수식을 이용해서 산정할 수 있다.

$$\tau_{i,j,k}^l < \frac{(P_i - P_j)}{w_k} \times \frac{100}{a_{ik}} \text{ if } i < k, \text{ or} \quad (13)$$

$$\tau_{i,j,k}^l > \frac{(P_i - P_j)}{w_k} \times \frac{100}{a_{ik}} \text{ if } i > k$$

순위가 변동하는데 필요한 대안들의 평가값이 이전에 산정된 값에 비해 어느 정도 증가하였는지를 비교하기 위해  $\tau_{i,j,k}^l$ 를 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\tau_{i,j,k}^l = \tau_{i,j,k} \times \frac{100}{a_{ik}} \quad (14)$$

그런데 만족할 만한  $\tau_{i,j,k}^l$ 를 산정하기 위해서는 변화된 평가지수의 값이 0보다 작아져서 효과가 반대로 나타나서는 안 되므로 다음 수식과 같은 조건을 만족해야한다.

$$\tau_{k,i,j}^l \leq 100 \quad (15)$$

평가기준  $C_j$ 에 대한 평가대안  $A_i$ 의 중요도 (criticality of degree of criterion  $A_i$ ),  $\Delta_{ij}^l$ 은 현재의 순위가 뒤바뀌는 가장 작은  $a_{ij}$ 의 변화율을 의미하며 다음과 같은 수식을 이용해서 산정될 수 있다.

$$\Delta_k^l = \min \{ \tau_{k,i,j}^l \} \quad (\text{모든 } m \geq i \geq 1, n \geq j \geq 1) \quad (16)$$

즉,  $\Delta_k^l$ 이 가장 결정적인 대안이라면 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\Delta_{Lk}^l = \min \{ \min \{ \tau_{k,i,j}^l \} \} \quad (n \geq k \geq 1) \quad (17)$$

평가기준  $C_j$ 에 대한 평가대안  $A_i$ 의 민감도 계수(sensitivity of coefficient of alternative  $A_i$ ),  $Sens(C_j)$ 는 평가기준 중요도  $\Delta_{ij}^l$ 의 역수이며 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$sens(a_{ij}) = \frac{1}{\Delta_{ij}^l} \quad (\text{모든 } m \geq i \geq 1, n \geq j \geq 1) \quad (18)$$

어떠한 가중치의 변화에도 대안들의 순위가 바뀌지 않는다면 민감도 계수는 0이 되어서 중요도는 계산할 수 없게 된다.

### 2.3 적용예제

본 연구에서 적용할 대상은 사전연구인 정은성(2012)에서 분석한 수자원 관리 계획 문제의 5개 대안이다. 대

상유역은 안양천 유역으로 의사결정을 위한 평가기준(criteria)과 적용할 대안들의 효과분석 결과는 기존의 값들을 이용한다. 5개 대안에 대한 설명은 본 연구의 선행연구인 정은성(2012)에 상세하게 제시되어 있다. 정은성 등(2008a)에서 깨끗한 유량을 확보하기 위해 사용한 19개 대안들 중 본 연구에서 5개만 사용한 이유는 기존연구에서 이미 고효율로 평가되어진 상위 순위의 대안 중 각기 다른 중유역에 위치하고 있기 때문이다. 즉 기존에 우수하다고 평가된 5개의 대안들 사이의 상대적인 평가를 수행하여 미세한 차이로 인한 우선순위의 변화를 확인하기 위함이다. 선택된 5개의 대안은 저수지 재개발(계수천), 하수도 시설 정비를 포함한 복개하천의 복원(당정, 산본, 수암천), 소규모 하수처리장 건설(도림천)이다.

5개의 대안들의 DPSIR (driving force-pressure-state-impact-response; European Environmental Agency, 1999) 요소별 값들은 정은성 등(2008a)에서 제시한 값을 표준화하여 사용하였다. 본 연구는 기존의 19개에 대한 상대비교가 아니라 선택된 5개에 대한 상대비교이기 때문이다. 표준화 전후의 자료는 정은성(2012)에 제시되어 있다. 또한 기존 연구와 다르게 비용(C)항목을 추가하여서 평가기준은 총 6개로 하였다. 비용 자료는 정은성 등(2008b)에 제시된 값을 이용하였다. 평가 인자별 가중치는 기존연구의 값과 새로 추가된 비용항목을 고려하여 다음과 같이 간략하게 정의하였다.

D(추진력)=P(압력)=0.1, S(상태)=I(영향)=0.15, R(반응)=0.2, 비용(C)=0.3

## 3. 연구결과

### 3.1 가장 결정적인 평가기준의 결정

본 연구의 적용예제의 경우 WSM을 이용하면 Table 1

Table 1. Results of WSM

Name of Alternative	D	P	S	I	R	Cost	Preference
Weights	0.100	0.100	0.150	0.150	0.200	0.3	1.0000
Alt 1	0.083	0.511	0.682	0.488	1.000	0.989	0.732
Alt 2	0.518	0.693	1.000	1.000	0.463	0.100	0.544
Alt 3	0.113	0.208	0.420	0.326	0.523	0.956	0.535
Alt 4	0.297	0.334	0.037	0.064	0.571	0.978	0.486
Alt 5	1.000	1.000	0.501	0.144	0.826	0.357	0.569

과 같이 Alt 1 > Alt 5 > Alt 2 > Alt 3 > Alt 4의 순서로 우선순위가 결정된다. 이와 같은 순위가 결정되는 데는 6개의 평가기준에 대한 가중치의 역할이 크게 작용하였다고 볼 수 있으며 이러한 6개의 평가기준 중 어느 조건이 가장 결정적인 역할을 하는지 확인할 수 있다. Eq. (2)를 이용하여 계산한 값은 Table 2와 같다. 이때 Eq. (3)의 조건을 만족하지 않는 결과는 NF(non-feasible)로 표기하였다. 즉 특정 평가기준에 대해 어느 정도 값이 변화하면 두 대안의 순위가 바뀌는지 제시하는 숫자이다. 예를 들면 Alt 2와 Alt 4의 경우 평가기준 비용에 대한 가중치가 0.066 만큼 커진다면 두 대안의 순위가 바뀐다는 의미이다.

이렇게 산정된  $\delta_{k,i,j}$  값을 Eq. (3)에 대입하여 순위를 변화시킬 최종 가중치,  $w_k^*$ 를 계산하면 Table 3과 같다. 즉,

현재 비용에 대한 가중치가 0.3인데 0.434로 바뀔 경우 Alt 4와 Alt 5의 순위는 바뀔 수 있다. Table 3의 결과를 모두 활용해서 의사결정에 활용할 수도 있지만 평가기준인 추진력(D), 압력(P)이 0.3 이상이 되어야 한다면 비용(C) 기준에 대한 가중치가 0.2 이하가 되어야 한다는 조건 등은 공학적인 판단근거로 납득하기 어려우므로 제외시켰다. Table 3의 결과를 이용해서 절대적인 변화량을 본래 산정한 가중치로 나눌 경우 순위가 바뀌는데 필요한 상대적 변화비율이 되므로 이를 산정하면 Table 4와 같다. 즉 비용의 경우 본래 가중치인 0.3에서 3.3%(0.01)가 줄어들고 다른 5개의 평가기준에 대한 가중치를 동일하게 증가시킬 경우(0.6%) 대안 A2와 A3의 순위가 바뀔 수 있다는 의미이다. 기본적으로 산정된 가중치는 작은 값에 많은 변

**Table 2. All Possible  $\delta_{k,i,j}$  Values (Absolute Change in Criteria Weights)**

Pair of Alternatives		Criterion					
		D	P	S	I	R	Cost
A1	A2	-0.432	NF	-0.591	-0.367	NF	0.211
A1	A3	NF	NF	NF	NF	NF	NF
A1	A4	NF	NF	NF	NF	NF	NF
A1	A5	-0.177	-0.332	NF	NF	NF	0.257
A2	A3	0.021	0.017	0.014	0.012	-0.140	-0.010
A2	A4	NF	NF	0.060	0.062	-0.533	-0.066
A2	A5	0.053	0.083	-0.051	-0.030	0.070	0.099
A3	A4	-0.268	-0.393	0.129	NF	NF	NF
A3	A5	0.038	0.043	NF	-0.186	0.112	-0.057
A4	A5	NF	NF	NF	NF	NF	-0.134

**Table 3. All Possible Changed Weights,  $w_k$**

Pair of Alternatives		Criterion					
		D	P	S	I	R	Cost
A1	A2	0.532	NF	0.741	0.517	NF	0.089
A1	A3	NF	NF	NF	NF	NF	NF
A1	A4	NF	NF	NF	NF	NF	NF
A1	A5	0.277	0.432	NF	NF	NF	0.043
A2	A3	0.079	0.083	0.136	0.138	0.340	0.310
A2	A4	NF	NF	0.090	0.088	0.733	0.366
A2	A5	0.047	0.017	0.201	0.180	0.130	0.201
A3	A4	0.368	0.493	0.021	NF	NF	NF
A3	A5	0.062	0.057	NF	0.336	0.088	0.357
A4	A5	NF	NF	NF	NF	NF	0.434

화가 필요할 경우 큰 의미가 없는 결과를 제시할 수 있기 때문이다. 비율이 낮게 계산된 값들이 상대적으로 민감한 대안들에 속한다고 볼 수 있다. 즉 Alt 2와 Alt 3의 경우 평가기준 비용의 현재 가중치를 3.3%만 변화시켜도 결과의 순위가 역전되는 현상을 확인할 수 있다.

평가 기준 중 순위에 가장 결정적인 영향을 미치는 기준을 판별하기 위해 Eqs. (9) and (10)을 이용해서 결정도

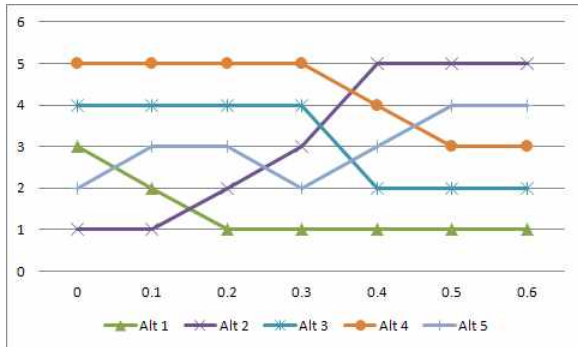


Fig. 1. Ranking Trajectories according to the Variation of Cost Weighting values

와 민감도를 Table 5와 같이 산정하였다. 즉, 평가기준, C (비용)의 경우 결정도가 3.3%, 민감도 계수가 30.6이므로 가장 결정력이 큰 계수로 나타났으며 평가기준 반응(R)이 상대적으로 가장 중요하지 않은 기준으로 나타났다. 비용의 경우 변화로 인해 순위 변경이 발생하는 경우의 수가 총 7개로 가장 많은 변화를 일으키는 평가기준으로 나타났다.

비용에 대한 가중치를 변화시킬 경우 발생하는 순위의 이동에 대해 분석을 실시하였으며 결과는 Fig. 1과 같다. 비용에 대한 가중치를 0에서 0.6까지 변화시키면서 다섯 개의 대안들이 변화하는 양상을 제시하였다. 이를 통해 비용에 대한 가중치 결정이 어떠한 대안들에게 얼마나 중요한지 확인할 수 있다.

### 3.2 가장 결정적인 대안의 결정

다섯 개 대안들의 값 중 어느 대안의 값들이 상대적으로 더 큰 영향을 크게 받는지에 대한 분석을 Eq. (14)를 이용해서 산정하였다. 두 대안간 평가기준별로 상대비교를 실시하였으며 결과는 Table 6과 같다. 즉 Alt 2와 Alt 3의 순위가 서로 바뀌려면 평가기준 Alt 2의 S와 I의 값이 현

Table 4. All Possible  $\delta_{k,i,j}^t$  Values (Percent Change in Criteria Weights)

Pair of Alternatives		Criterion					
		D	P	S	I	R	Cost
A1	A2	-431.8%	NF	-393.7%	-244.6%	NF	70.4%
A1	A3	NF	NF	NF	NF	NF	NF
A1	A4	NF	NF	NF	NF	NF	NF
A1	A5	-177.0%	-331.7%	NF	NF	NF	85.7%
A2	A3	20.7%	17.3%	9.6%	8.3%	-69.8%	-3.3%
A2	A4	NF	NF	40.0%	41.1%	-266.7%	-21.9%
A2	A5	52.9%	83.2%	-34.1%	-19.9%	35.1%	33.0%
A3	A4	-268.5%	-392.9%	85.9%	NF	NF	NF
A3	A5	38.2%	42.8%	NF	-123.8%	55.9%	-18.9%
A4	A5	NF	NF	NF	NF	NF	-44.7%

Table 5. Results of Criticality and Sensitivity Coefficients of Six Criteria

Category	D	P	S	I	R	Cost
Criticality	20.7%	17.3%	9.6%	8.3%	35.1%	3.3%
Sensitivity	4.8	5.8	10.4	12.1	2.8	30.6
Ranking	5	4	3	2	6	1
Number of feasible weights	5	5	5	5	4	7

Table 6. Threshold Values  $\tau_{i,j,k}^l$  (%) in Relative Terms

Alternative $A_i$	Alternative $A_k$	Criterion					
		D	P	S	I	R	Cost
Alt 1	Alt 2	NF	NF	NF	NF	NF	NF
Alt 1	Alt 3	NF	NF	NF	NF	NF	NF
Alt 1	Alt 4	NF	NF	NF	NF	NF	NF
Alt 1	Alt 5	NF	NF	NF	NF	NF	NF
Alt 2	Alt 1	NF	NF	NF	NF	NF	NF
Alt 2	Alt 3	16.2	12.1	NF	NF	9.1	27.9
Alt 2	Alt 4	NF	83.3	NF	NF	62.4	NF
Alt 2	Alt 5	-49.3	-36.8	-17.0	-17.1	-27.6	-85.1
Alt 3	Alt 1	NF	NF	NF	NF	NF	-68.4
Alt 3	Alt 2	-74.2	-40.3	-13.3	-17.1	-8.0	-2.9
Alt 3	Alt 4	NF	NF	78.4	NF	47.2	NF
Alt 3	Alt 5	NF	NF	-53.8	-69.3	-32.4	-11.8
Alt 4	Alt 1	NF	NF	NF	NF	NF	-83.7
Alt 4	Alt 2	NF	NF	NF	NF	-50.6	-19.7
Alt 4	Alt 3	NF	NF	NF	NF	-43.2	-16.8
Alt 4	Alt 5	NF	NF	NF	NF	-72.9	-28.4
Alt 5	Alt 1	NF	NF	NF	NF	-98.2	NF
Alt 5	Alt 2	NF	NF	34.0	NF	15.4	23.8
Alt 5	Alt 3	NF	NF	45.1	NF	20.5	31.6
Alt 5	Alt 4	NF	NF	NF	NF	NF	77.7

Table 7. Criticality Degrees  $\Delta_{i,j}^l$  (%) for Each  $a_{ij}$  Performance Measure

Name of Alternative	Criterion					
	D	P	S	I	R	Cost
Alt 1	NF	NF	NF	NF	NF	NF
Alt 2	16.2	NF	NF	NF	9.1	27.9
Alt 3	74.2	40.3	13.3	17.1	8.0	2.9
Alt 4	NF	NF	NF	NF	43.2	16.8
Alt 5	NF	NF	34.0	NF	15.4	23.8

재 값에서 5.5% 감소해야한다는 의미이다.

$A_i$ 의 대안별로 각 평가기준에 해당하는 4개의 값 중 가장 작은 값의 절대값을 정리하면 Table 7과 같다. 이렇게 정리한 값이 Eq. (17)의 중요도인  $\Delta_{i,j}^l$ 에 해당하는 값이다. 즉 Alt 3은 다른 대안들 중에서 Alt 2와 가장 근접한 상태인데 현재 값의 2.9%를 감소시킬 경우 순위가 바뀐다는 의미이다. Table 6의 값을 Eq. (18)을 이용해서 민감도 계수를 산정하면 Table 8과 같다. 민감도가 클수록 가장 주

의가 필요하다는 것을 의미하므로 대안별 효과정도를 분석할 때 신중해야한다는 의미이다. 따라서 Alt 3의 비용에 대한 부분은 본 연구 내용 중에 가장 중요한 숫자이므로 이에 대한 산정은 매우 신중하게 이루어져야 함을 의미한다. 그 다음으로 Alt 3과 Alt 2, Alt 5의 평가기준 R에 대한 값들도 다른 자료에 비하면 상당히 신중하게 분석해야 함을 알 수 있다.

**Table 8. Changed Performance Measures**

Name of Alternative	Criterion					
	D	P	S	I	R	Cost
Alt 1	NF	NF	NF	NF	NF	NF
Alt 2	16.2	NF	NF	NF	9.1	27.9
Alt 3	74.2	40.3	13.3	17.1	8.0	2.9
Alt 4	NF	NF	NF	NF	43.2	16.8
Alt 5	NF	NF	34.0	NF	15.4	23.8

**Table 9. Sensitivity Coefficients  $sens(a_{ij})$  for Each Performance Measure**

Name of Alternative	Criterion					
	D	P	S	I	R	Cost
Alt 1	NF	NF	NF	NF	0.012	0.018
Alt 2	0.062	NF	NF	NF	0.110	0.036
Alt 3	0.013	0.025	0.075	0.058	0.125	0.342
Alt 4	0.006	0.007	0.001	0.002	0.023	0.059
Alt 5	0.039	0.039	0.029	0.001	0.065	0.042

#### 4. 결론

본 연구는 다기준 의사결정 기법을 적용할 때 항상 발생할 수 있는 가중치의 불확실성에 대해 일반적인 민감도 분석 방법을 제시하였고 수자원 계획 문제에 직접 적용하여 보았다. 일반적으로 발생할 수 있는 불확실성 문제는 순위가 뒤바뀔 수 있는 가중치가 어느 정도이며 그 중 가장 결정적인 역할을 하는 평가기준은 무엇인가와 순위가 뒤바뀔 수 있는 각 대안들의 평가치가 어느 정도이며 그 중 가장 결정적인 대안은 무엇인가이다. 다음은 본 연구를 통해 도출된 결론이다.

- 1) 가중치의 결정은 의사결정문제에서 가장 중요한 요소이므로 이에 대한 결정은 매우 신중해야 한다. 따라서 대부분의 연구에서 가중치 산정의 객관화에 많은 노력을 기울이고 있다. 하지만 가중치를 객관적으로 산정하기 매우 어려운 문제들의 경우 본 연구에서 제시하는 민감도 분석을 통해 가중치 결정 문제를 보다 단순화하여 접근할 수 있다. 본 연구에서는 비용 항목에 대해 30%의 가중치가 가정되어 있음에도 불구하고 가장 민감한 결과를 보였다. 즉 비용항목에 대한 가중치 결정이 가장 중요한 요소임을 도출하였다.
- 2) 대안의 효용을 나타내는 평가치도 의사결정에 대한

중요도가 서로 다를 수 있음을 확인할 수 있다. 대안의 효과에 대한 평가치가 조금 변해도 전체 의사결정에 크게 영향을 미치는 값이 있고 반대의 경우가 있는 경우도 있다. 민감도 분석을 통해 이러한 결과를 제시할 수 있다. 본 연구에서 대안 3의 비용과 반응 항목은 각각 중요도가 2.9%, 8.0%로 상당히 작았다. 즉 대안 3의 비용과 반응에 대한 평가치의 작은 변화에도 순위 변동이 일어난다는 의미이다. 따라서 대안 3의 비용과 반응에 대한 평가치 산정을 위해 보다 신중한 분석이 이루어져야 함을 의미한다. 본 연구의 민감도 분석 방법은 향후 수자원 계획 수립 문제에 폭넓게 사용될 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 기초연구사업(2010-0010609)의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

정은성 (2012). “수자원 계획수립을 위한 다기준 의사결정 기법의 민감도 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수



자원학회(심사중)

정은성, 이길성, 박경신 (2008a). “다기준 의사결정기법을 이용한 대안평가지수 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제1호, pp. 87-100.

정은성, 공기서, 이길성, 유진채 (2008b). “실험선택법과 대안평가지수를 이용한 대안의 편익산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제1호, pp. 101-113.

Ascough II, J.C., Maier, H.R., Ravalico, J.K., and Strudley, M.W. (2008). “Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making.” *Ecological Modelling*, Vol. 219, pp. 383-399.

European Environment Agency (1999). *Environmental Indicators: Typology and Overview*. Copenhagen, Denmark.

Fredrick, S., and Petermann, R. (1995). “Choosing fisheries harvest policies: When does uncertainty matter?” *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 52, No. 2, pp. 291-306.

Mogan, M.G., and Henrion, M. (1990). *Uncertainty: A Guide ro Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge University

Press, Cambridge.

Regan, H.M., Colyvan, M., and Burgman, M.A. (2002). “A taxonomy and treatment of uncertainty for ecology and conservation biology.” *Ecological Applications*, Vol. 12, No. 2, pp. 618-628.

Rose, K.A., and Cowan, J.H. (2003). “Data, models, and decisions in US marine fisheries management: Lessons for ecologists.” *Reviews for Ecology, Evolution and Systematics*, Vol. 34, pp. 127-151.

Triantaphyllou, E., and Sanchez, A. (1997). “A sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision making methods.” *Decision Sciences*, Vol. 28, No. 1, pp. 151-194.

Walker, W.E., Harremoes, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J.P., van Asselt, M.B.A., Janssen, P., and Krayenbühl, M.P. (2003). “Defining uncertainty a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support.” *Integrated Assessment*, Vol. 4, No. 1, pp. 5-17.

논문번호: 11-095	접수: 2011.08.12
수정일자: 2011.12.19/2012.01.18	심사완료: 2012.01.18